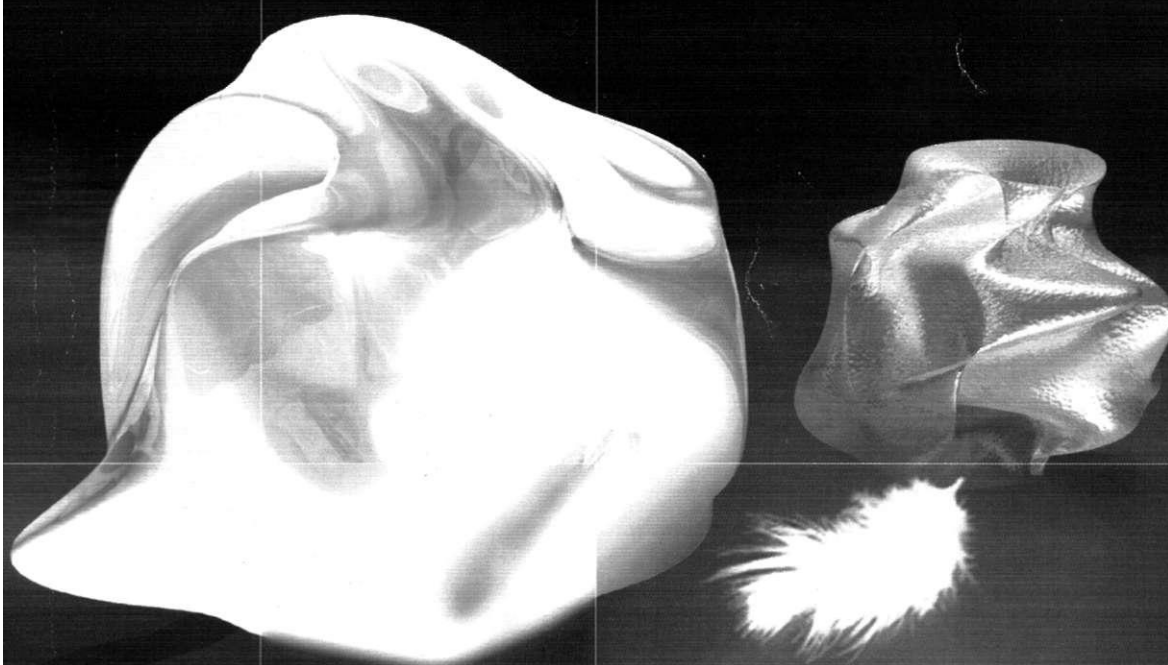


Том 3, № 3, Сентябрь 2008

ISSN 1819-4362

НЕЧЕТКИЕ СИСТЕМЫ И МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ



Научный журнал Российской ассоциации
нечетких систем и мягких вычислений

КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И АЛГОРИТМ САМООРГАНИЗАЦИИ БАЗ ЗНАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Литвинцева Л.В., Сорокин С.В., Ульянов С.В.

Международный университет природы, общества и человека «Дубна», Дубна
Тверской государственной университет, Тверь

Поступила в редакцию 15.03.2008.

Обсуждается роль и методология применения квантовых вычислений в задачах проектирования робастных структур интеллектуальных систем управления в условиях непредвиденных ситуаций управления. Разработан обобщенный квантовый алгоритм самоорганизации, содержащий как частный случай структуру алгоритма управления самоорганизацией робастных баз знаний. Достижение введенного термодинамического критерия оптимального распределения уровней устойчивости, управляемости и робастности является целью применения квантового алгоритма управления самоорганизацией баз знаний, используемого в контуре управления в реальном времени.

The role and methodology of quantum computing application in design of robust intelligent control systems in unpredicted control situations are discussed. Generalized quantum algorithm of self-organization is developed that as a particular case includes the structure of self-organization robust KB control algorithm. The goal of applied self-organization RB quantum control algorithm is the achievement of introduced thermodynamic criteria in distributed optimal trade-off between stability, controllability, and robustness that are used in control loop in on-line.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, робастность, квантовый алгоритм, самоорганизация, принцип минимума производства энтропии.

Keywords: intelligent control, robustness, quantum algorithm, self-organization, principle of entropy production minimum.

Введение: роль и проблемы разработки интеллектуальных систем управления

Одним из основных назначений и преимуществ эффективного и практического применения интеллектуальных систем управления (ИСУ) является возможность гарантированного достижения цели управления с максимальным качеством управления на верхнем уровне и минимальным расходом полезного ресурса системы «*объект управления (ОУ) + регулятор*» на нижнем (исполнительском) уровне иерархической системы автоматического управления [1]. Данное определение по своей сути отражает на содержательном уровне назначение

целенаправленной деятельности ИСУ в общем случае непредвиденных ситуаций управления. При этом эффективность применения ИСУ с указанной возможностью зависит от уровня интеллектуальности разработанной системы. Важную роль при формировании уровня интеллектуальности САУ играет выбор используемого инструментария технологии интеллектуальных вычислений¹ для проектирования соответствующей базы знаний (БЗ) при заданной цели управления.

Роль ИСУ

Разработка ИСУ для традиционных систем автоматического управления (сокращенно САУ) с повышенным уровнем робастности, способных поддерживать требуемые уровни точности и надежности в условиях непредвиденных ситуаций управления, стала объектом интеллектуальной собственности [3] и имеет существенное теоретическое, практическое и коммерческое значение. Программно-аппаратная поддержка ИСУ стала товаром при коммерциализации интеллектуального продукта в инженерном менеджменте основанного на знаниях [4]. В частности, важным направлением прикладного применения ИСУ является повышение уровня *робастности* традиционных (П/ПИ/ПД/ПИД)-регуляторов, используемых на нижнем уровне контуров управления.

Примечание. Согласно [3], традиционный ПИД-регулятор используется в более чем 85% в контурах управления промышленных и непромышленных структур САУ, включая объекты с повышенной социально-экономической ответственностью. Поэтому одной из важных конкретных (теоретических и практических) проблем в создании ИСУ является разработка методов и алгоритмов повышения надежности и качества управления исполнительского (нижнего) уровня САУ, основанного на традиционном ПИД-регуляторе. При этом, следуя [1, 4], выполняется принцип «*неразрушения исполнительского уровня*», что приводит к эффективному использованию существующих отлаженных промышленных технологических процессов и повышенному экономическому эффекту.

Использование нечетких регуляторов (НР) совместно с ПИД-регулятором привело к созданию гибридных нечетких ИСУ с различными уровнями интеллектуальности в зависимости от полноты и корректности спроектированной базы знаний (БЗ) [5].

Проблемы разработки ИСУ

Одной из трудностей разработки ИСУ для непредвиденных ситуаций управления является решение проблемы проектирования соответствующей робастной БЗ, использующей объективные знания о динамическом поведении ОУ и нечетких ПИД-регуляторов. Решение данной задачи существенно зависит от возможности разработки алгоритмически разрешимой, физически/математически корректной модели [6] и инструментария практической реализации процесса извлечения, обработки и формирования объективных знаний без участия эксперта.

¹Определение и термин «интеллектуальные вычисления» введены в середине 90-х прошлого столетия [2]. Последующее развитие технологии интеллектуальных вычислений нашло в новых видах эволюционного программирования, алгоритмах оптимизации типа иммунных алгоритмов, на основе поведенческих реакций толпы (людей в тоннеле, колоний муравьев, стай птиц и рыб, животных и т.п. – swarm intelligence optimization), квантовых генетических алгоритмов глобальной оптимизации и квантовых нейронных сетях обучения и др.

Введение физических и информационных ограничений в формализованное описание модели ОУ [1, 6] существенно влияет на качество формируемой БЗ в ИСУ, а исключение этих ограничений из описания моделей ОУ приводит к некорректности и потере робастности проектируемых законов управления соответственно. Поэтому одной из сложных и ключевых проблем разработки основы информационной технологии проектирования ИСУ для такого широкого класса ОУ является создание процесса проектирования робастных БЗ в непредвиденных ситуациях управления для исполнительского уровня иерархической структуры управления, учитывающего в производционных правилах БЗ реальные физические и информационные ограничения.

Технология проектирования и структуры ИСУ

Рисунок 1,а показывает типовую структуру ИСУ и описывает рассматриваемую в данной статье проблему проектирования объективной БЗ. Рисунок 1,б представляет структурную схему информационной технологии и этапы проектирования объективной БЗ для робастных ИСУ, основанных на новых видах интеллектуальных вычислений.

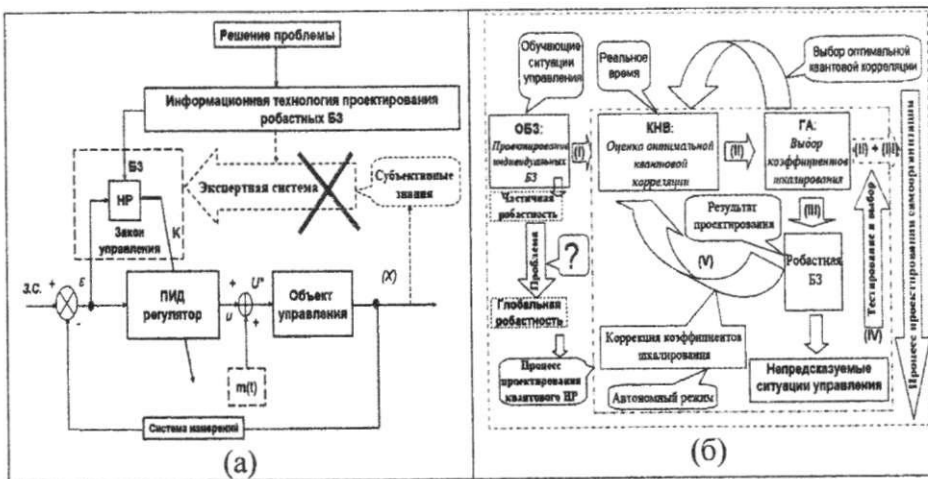


Рис. 1. Проектирование робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления: (а) - проблема проектирования БЗ; (б) - структура технологии и этапы проектирования

Структуры робастных ИСУ, основанные на разработанной технологии проектирования (см. рис. 1,б), показаны на рис. 2.

Примечание 1. На рис. 1 и 2, а также далее по тексту используются следующие обозначения: ГА - генетический алгоритм; НР - нечеткий регулятор; КНВ - квантовый нечеткий вывод; ОБЗ - оптимизатор баз знаний; ГИОС - глобальная интеллектуальная обратная связь; КА - квантовый алгоритм; ОУ - объект управления.

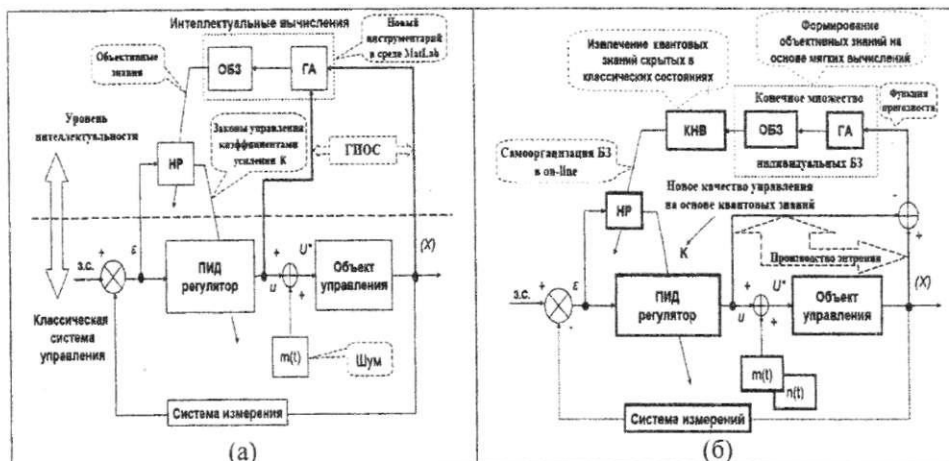


Рис. 2. Структуры ИСУ с оптимизаторами БЗ (ОБЗ) на интеллектуальных вычислениях: (а) – структура ИСУ с ОБЗ на мягких вычислениях; (б) – структура ИСУ с ОБЗ на квантовых вычислениях

В непредвиденных ситуациях управления, КНВ на основе реакций продукционных правил робастных БЗ спроектированных НР (см. рис. 2) формируют и реализуют в реальном времени законы управления с учетом реальных нелинейных физических и информационных ограничений на условия функционирования ОУ. В результате робастность ИСУ проектируется с помощью КНВ в законах управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора, включающих отмеченные особенности. В качестве инструментария моделирования продукционных правил БЗ используется технология мягких и квантовых вычислений.

Цель работы

В данной работе рассматривается роль и влияние физических (квантовых и термодинамических) эффектов на качество управления и квантовый алгоритм управления самоорганизацией знаний. При этом основное внимание уделяется описанию качественных особенностей биологически воспроизводимой эволюции самоорганизации, основные компоненты которой составляют содержание разработанной модели квантового алгоритма управления процессом самоорганизации. Результаты демонстрируют возможность эффективного применения технологии проектирования робастных БЗ в структуре ИСУ (см. рис. 1,б и рис. 2,б). В следующей работе рассматривается задача робастного управления в непредвиденных ситуациях на основе квантовых стратегий принятия решений в виде инструментария КНВ как частного случая разработанного обобщенного квантового алгоритма управления самоорганизацией.

Прикладные аспекты

Разработанный программный инструментарий новых интеллектуальных вычислений реализует принцип самоорганизации БЗ на основе квантового подхода и осуществляет оптимизацию термодинамического критерия распределения качества управления как устойчивость, управляемость и робастность. Введенный

квантовый алгоритм является новым квантовым поисковым алгоритмом. Решение задачи проектирования робастного управления классическим ОУ (локально или глобально неустойчивым и существенно нелинейным) рассматривается в [7] в качестве примера (Benchmark) эффективного использования разработанной информационной технологии проектирования.

Данные примеры наглядно иллюстрируют возможность эффективного применения технологии квантовых вычислений для решения таких алгоритмически неразрешимых задач классическими методами как проектирование глобальной робастности ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций управления [7, 8].

1. Роль и принципы технологий интеллектуальных вычислений в процессах проектирования ИСУ

В традиционных исчислениях по количественному результату численного алгоритма осуществляется соответствующая оценка качественного свойства исследуемого объекта. Логическая оценка качества в общем случае может быть осуществлена только в конце количественных вычислений, а для алгоритмически неразрешимых численных проблем (сложность алгоритма по Колмогорову), часто искомая оценка достигнута быть не может [6]. Основой интеллектуальных вычислений являются не только числовые шкалы (как в традиционных вычислениях), но и качественные характеристики исследуемого объекта. Целью и возможностью интеллектуальных вычислений является непосредственное определение качественных характеристик объекта, алгоритмически оперируя последними также как на числовых шкалах. Количественные оценки объекта можно получить из качественных оценок обратным отображением шкал. Мягкие и квантовые вычисления являются примерами таких исчислений. При этом многие классические задачи могут быть решены с экспоненциальным ускорением или решены алгоритмически неразрешимые задачи [9 - 11].

Так, например, для определения качественной характеристики функции (постоянная или балансирующая для четырех аргументов) в традиционном подходе требуется четыре шага численных операций, в то же время квантовый алгоритм Дейча (1985г.) определяет данное качество исследуемой функции за один шаг. Алгоритм Шора решает задачу факторизации заданного числа с экспоненциальной скоростью по отношению к лучшему известному алгоритму, а при увеличении длины решает алгоритмически неразрешимую задачу с полиномиальной сложностью. Алгоритм Гровера осуществляет поиск решения в неструктурированных данных с квадратичной скоростью. Нечеткие множества, введенные в 1965 г. Л. Заде, позволяют расширить (многовековое) определение самого числа и ввести множество новых шкал качественных характеристик, которые невозможно определить методами классических исчислений.

Такие исчисления открывают новые возможности для теории и проектирования ИСУ.

Нестандартные логики, используемые в основе интеллектуальных вычислений, и выводы, полученные с их применением в задачах принятия решений и управления, часто приводят к мнимым «парадоксам» и противоречию с интуитивными представлениями инженера-исследователя об ожидаемом результате. Однако сам термин «нестандартная» логика уже включает такую ситуацию, а его введение обосновано стремлением решать задачи, не решаемые существующими технологиями. К таким технологиям интеллектуальных вычислений относятся

мягкие и квантовые вычисления, используемые в данной работе для проектирования робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления. Применение новых технологий в инженерной практике теории и систем управления часто сталкивается с проблемами преодоления инерции «прагматической» интуиции и инженерной философии. Так происходило в середине 70-х прошлого столетия при внедрении в инженерную практику идей мягких вычислений на основе теории нечетких множеств (один из авторов [1] является пионером в этой области).

Рассмотрим кратко методологические особенности применения технологий мягких и квантовых вычислений.

1.1 Технология мягких вычислений

Обобщение понятия числа за счет введения субъективной качественной шкалы (и отображения в нее в виде лингвистической аппроксимации его количественной характеристики) привело к 30-летней дискуссии с представителями научной школы теории вероятностей. К таким трудностям относится, например, корректное определение понятий функции принадлежности, логические взаимоотношения «нечеткая/случайная величина» и др. Основой технологии мягких вычислений является *нечеткая логика*, в которой не используется *закон исключения третьего*. Это приводит к нестандартному выводу о возможности одновременного рассмотрения, например, числа 10 на шкале $[0, 100]$ как лингвистической переменной «*большой*» или «*маленький*» с различными значениями функции принадлежности на заданной качественной лингвистической шкале. Только практическое применение нечетких САУ классическими ОУ разъяснило и сняло разногласия и трудности определений индивидуальных и массовых событий, операции осреднения и извлечения информации и т.п. В результате нечеткие модели логического вывода на фазовом пространстве лингвистических переменных позволили разработать нечеткие ИСУ, эффективно решающие задачи управления в условиях существенной неопределенности исходной информации, слабой формализации описания объекта управления, нечеткости целей управления [1].

Одной из основных проблем практического и эффективного применения технологии мягких вычислений в задачах управления являлось решение следующих задач: (а) объективное определение вида функции принадлежности и ее параметров в продукционных правилах БЗ; (б) определение оптимальной структуры нечетких нейронных сетей (ННС) в задачах обучения (аппроксимация обучающего сигнала с требуемой ошибкой и с минимальным количеством продукционных правил в БЗ); (в) применение генетического алгоритма (ГА) в задачах многокритериального управления и наличии дискретных ограничений на параметры объекта управления; и др.

Перечисленные проблемы были решены и апробированы на основе разработанного авторами оптимизатора БЗ (ОБЗ) с применением технологии мягких вычислений. Разработанный интеллектуальный инструментарий позволил проектировать робастные БЗ на основе решения одной из алгоритмически трудно решаемых задач теории искусственного интеллекта – извлечения, обработки и формирования объективных знаний без использования экспертных оценок. В данном оптимизаторе используются три ГА, которые позволяют спроектировать, как следствие, оптимальную структуру ННС (вид функций принадлежности и их параметры, количество внутренних слоев и др.), аппроксимирующей обучающий сигнал с требуемой ошибкой.

Объединение методологий стохастического и нечеткого моделирования ИСУ в инструментарии разработанного авторами ОБЗ позволило повысить уровень робастности проектируемых БЗ и решать сложные задачи формирования объективных знаний. Однако, при существенном изменении или непредвиденных ситуациях управления, спроектированные законы управления, не всегда удовлетворяют условиям робастности. Данный эффект определяется функциональной структурой ГА, в которой (по определению) пространство поиска решений фиксировано и задается экспертом, а также выбором функции пригодности, которая рассматривается как критерий оптимального управления [5].

Таким образом, найденное технологией мягких вычислений (на основе ГА) оптимальное решение соответствует заданной ситуации управления, содержит (в неявном виде) субъективность исходной информации, а при неправильном определении пространства поиска найденное решение может неадекватно соответствовать ситуации управления. Для такого рода ситуации управления требуется привлечение новых технологий интеллектуальных вычислений, такой как технология интеллектуальных квантовых вычислений [7]. Следует отметить, что технология мягких вычислений уже эффективно применяется в задачах управления квантовыми ОУ [8]. Однако до настоящего времени применение квантовых вычислений для эффективного решения классических алгоритмически неразрешимых задач теории и систем управления сталкивалось с утверждением Ю. Манина и Р. Фейнмана (введенного в начале 80-х прошлого столетия) о необходимости применения квантовых вычислений к решению квантовых задач.

1.2 Технология квантовых вычислений

В квантовой логике технологии интеллектуальных квантовых вычислений и квантовой теории информации не выполняется классический закон *дистрибутивности*, что отражает новые (необычные) явления типа некоммутативности переменных, неопределенности и невозможности одновременного точного измерения наблюдаемых и др. в квантовой механике. В результате необычные явления для классической физики, такие как запутанные состояния (entanglement), телепортация, сверхплотное кодирование приводят к «парадоксам» и трудностям физической интерпретации с позиции логики классической физики. Так, например, две подсистемы, каждая из которых находится в смешанном хаотическом состоянии (и с отличной от нуля энтропией), при слиянии в единую систему образуют чистое (с нулевой энтропией) состояние, обладающее высшим уровнем порядка (эффект квантовой самоорганизации). При этом количество информации в целой системе меньше чем в каждой из её составляющих подсистем, а взаимная энтропия имеет *отрицательное* значение. Квантовая суперпозиция, состоящая из двух классических *взаимоисключающих* логических состояний, позволяет образовать одно единое состояние, содержащее, например, одновременно логически противоречащие «да» и «нет» (кот Шрёдингера). Из двух классических однобитовых состояний с помощью квантовой корреляции (которая выше классической) возможно дополнительно (в зависимости от вида квантовой коммуникации) извлечь еще более одного бита. Квантовые стратегии принятия решений позволяют из двух классических игроков, не имеющих стратегий выигрыша в данной игровой ситуации, сформировать игрока-победителя («Паррondo» эффект), использующего квантовый подход к решению задачи [7 - 9].

Таким образом, описание на квантовом языке постановок многих классических (слабо структурированных) инженерных задач (трудно решаемых на языке

классической логики) позволяет найти их эффективное решение. Однако такой подход имеет ряд особенностей при практическом применении в задачах управления. В теории квантовой информации и квантовых вычислений понятию числа соответствуют понятия *наблюдаемой* и *суперпозиции* состояния наблюдаемых квантовой системы, а необратимое измерение дает одно из возможных состояний [9 - 11]. Рисунок 3 демонстрирует физическое различие в определении вычисли-

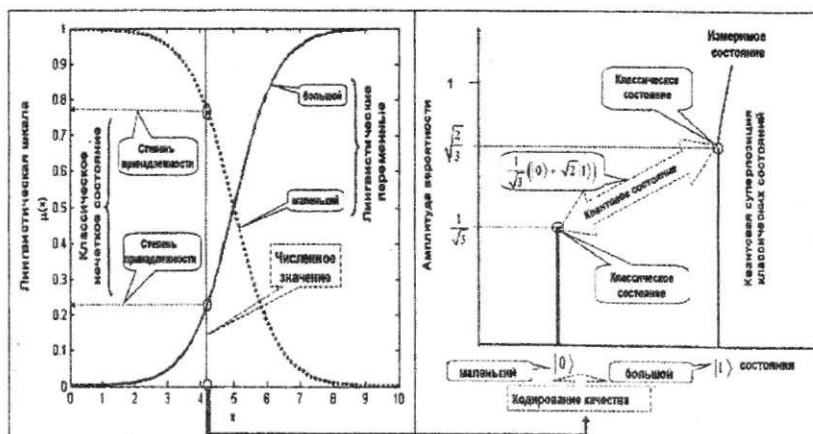


Рис. 3: Физическое различие между нечетким и квантовым состояниями

Из рис. 3 видно, что нечеткое состояние числа имеет два значения функции принадлежности на шкале лингвистического описания (принцип исключения третьего не выполняется), а квантовое состояние состоит из *двух классических состояний*, качественные характеристики которых закодированы в квантовых переменных, связанных принципом квантовой логической дополнителности. Совместное использование вычислительных базисов из рис.3 приводит к новому виду квантовых мягких вычислений.

Положительные результаты применения классических технологий интеллектуальных вычислений (типа мягких вычислений) совместно с аппаратом квантовых вычислений привело к новому альтернативному подходу – применению технологии квантовых интеллектуальных вычислений в задачах оптимизации процессов управления классическими ОУ (физический аналог применения обратного метода исследования «квантовая система управления – классический ОУ») [12 - 17]. Такой подход также существенно расширяет возможности самих интеллектуальных вычислений [8].

2. Постановка задачи и особенности метода решения

В данной статье рассмотрена следующая задача: разработать методологию и алгоритмическую основу информационной технологии проектирования робастных ИСУ – квантовый алгоритм управления самоорганизацией активных (в реальном времени) знаний на основе робастных БЗ в нечетких ПИД-регуляторах в условиях неопределенности исходной информации и непредвиденных ситуаций управления. Решение данной задачи непосредственно связано со следующей (трудной и принципиально важной для теории и систем управления) проблемой:

определение роли и влияния квантовых эффектов на повышение уровня робастности проектируемых ИСУ.

Согласно рис. 1,б, центральным моментом эффективного применения технологии процессов извлечения, обработки и сжатия ценной информации для формирования активных знаний в виде робастных БЗ является *структурированный* случайный поиск (на основе технологии мягких вычислений, Этап 1 – формирование конечного множества индивидуальных БЗ в конкретных ситуациях управления с обучением). Использование в разработанном алгоритме *квантовых стратегий управления самоорганизацией* знаний составляет сущность Этапа 2, на котором на основе *квантового нечеткого вывода* (КНВ) осуществляется самоорганизация активных (в реальном времени) знаний из реакций спроектированных индивидуальных БЗ на новую непредвиденную ситуацию управления. Уровни самоорганизации в иерархии активных знаний и когнитивных эволюционных процессов управления были проанализированы с точки зрения интеллектуальной системной инженерии (Intelligent System of Engineering Systems) как новой прикладной ветви теории искусственного интеллекта [12].

Показано [14, 15], что для гарантированного достижения цели управления законы управления изменением коэффициентов усиления (coefficient gain schedule) нечеткого ПИД-регулятора должны проектироваться на основе *активных* знаний, позволяющие распознавать физические особенности и информационные ограничения на ОУ. Извлеченные знания используются для самоорганизации данного ОУ при достижении цели управления в конкретной ситуации управления. Решение поставленной задачи осуществляется на основе технологии мягких и квантовых вычислений.

В разработанной технологии эффективно реализуется новый принцип [7] проектирования робастных структур ИСУ: *проектирование простого по структуре и в практической реализации НР с повышенным уровнем интеллектуальности (wise controller) для эффективного управления сложными ОУ.*

3. Квантовый алгоритм управления процессом самоорганизации

Обобщенной характеристикой самоорганизующихся систем, представляющей особый интерес для ИСУ, является следующая особенность: они обладают *робастными* или *гибкими* структурами. При этом сам процесс биологически воспроизводимой самоорганизации включает в себя процессы самообучения и самоадаптации за счет отмеченных свойств. Наличие свойства самоорганизации в природных и биологически воспроизводимых системах объясняется рядом факторов [18]. Первым фактом наличия толерантности является *избыточность* или свойство *распределения* самоорганизация между выделенными «защищенными» зонами эволюции структуры системы, в которых выполняется свойство самоорганизации. Вторым фактором наличия внутренней робастности является её проявление за счет рандомизации, флуктуаций или шумов. Третьим фактором является проявление стабилизирующих эффектов гибких структур в контурах обратных связей.

Рассмотрим особенности и общие характеристики (биологически воспроизводимой в естественной природе) процессов самоорганизации, составляющие основу инженерии проектирования (см. рис. 1,б) в разработке искомой модели квантового алгоритма управления самоорганизацией робастных БЗ в структурах ИСУ (см. рис. 2,б).

3.1 Биологически воспроизводимый алгоритм самоорганизации

Рисунок 4 иллюстрирует структуру биологически воспроизводимого алгоритма самоорганизации, разработанного в [8,13, 17] на основе анализа макро - и микро - моделей самоорганизации.

А. Используемые модели.

Для анализа в качестве Benchmarks были выбраны следующие информативно представительные модели из многоуровневой иерархической структуры процессов самоорганизации [8]: (1) самоорганизация поведения толпы людей в тоннеле; (2) самоорганизация (людей, колонии муравьев и т.п.) в экстремальных условиях (типа паники при пожаре и т.п.); (3) самоорганизация движения автомобилей на скоростных трассах [19]; (4) самоорганизация на микроуровне (swarm intelligence of self-organization - колонии муравьев при поиске пищи, интеллектуальные агенты с обменом информацией, инженерия самоорганизации колоний бактерий) [20 - 22]; (5) квантовая кооперация насекомых [23], квантовая самоорганизация наносистем (квантовые кораллы) за счет передачи информации на микроуровне [24] и изменения типа квантовой корреляции [25].

Отметим общие качественные особенности моделей процессов самоорганизации. Процесс самоорганизации в общем виде включает четыре составляющих механизма: (i) позитивная обратная связь; (ii) отрицательная обратная связь; (iii) сбалансированное соотношение между используемым и потенциальным ресурсами эволюции (информационно-термодинамического) поведения динамической системы; и (iv) многократное (физическое и информационное) взаимодействие между компонентами.

Природная (биологически воспроизводимая) эволюция достижения самоорганизации динамической системы основана на следующих этапах: (i) формирование (задание) множества невязанных элементов (templating) исходной структуры; (ii) самосборка (self-assembling) новой структуры; and (iii) самоорганизация (self-organization) робастной структуры. При этом «самосборка» в общем виде отличается от «самоорганизации» отсутствием в «самосборке» предварительного выбора типа корреляции между невязанными элементами и процесс осуществляется за счет локальных взаимодействий и внешних (в общем случае случайных) воздействий [18 - 21].

Данные этапы отражены на рис. 4,б.

Примечание. Существует «парадокс», утверждающий, что процессы самоорганизации находятся в противоречии со вторым законом термодинамики, согласно которому эволюция систем стремится к беспорядку (возрастанию энтропии). Данный «парадокс» разрешен в терминах многократных взаимодействий макро- и микроуровней эволюции (открытая термодинамическая система) самоорганизации и снижением производства энтропии на макроуровне (увеличение упорядоченности) за счет повышения производства энтропии на микроуровне (увеличение хаоса поведения).

Все из выбранных для анализа примеров обладают перечисленными механизмами [8].

Б. Анализ моделей.

Из анализа свойств перечисленных моделей самоорганизации следует наличие у них общих биологически воспроизводимых *квантовых* эффектов, присутствующих в процессах самоорганизации, а сами модели основаны на следующих *информационно-термодинамических* концепциях: (i) взаимодействия между элементами и микро- и макроуровнями осуществляются с обменом инфор-

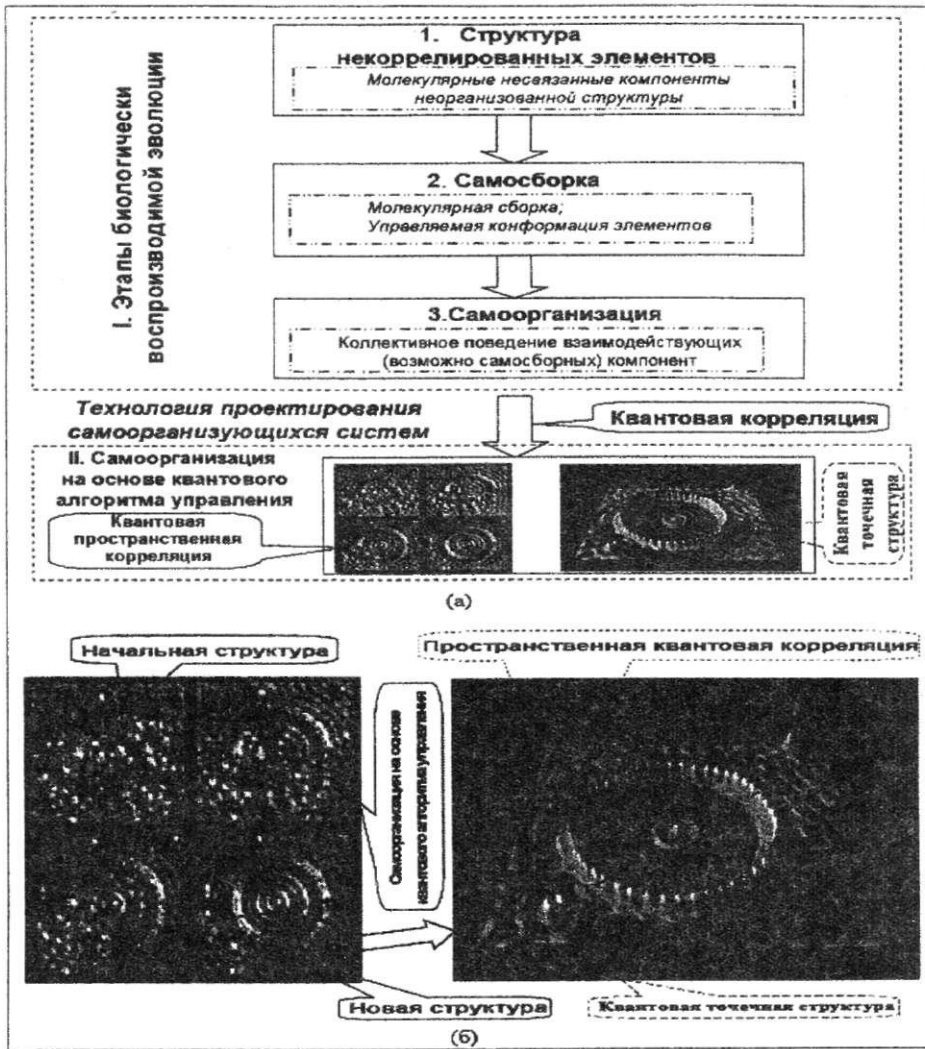


Рис. 4: Структура биологически воспроизводимого алгоритма самоорганизации

мации. Так, в модели интеллектуальных агентов микроуровень представляется в виде информационного пространства, на котором проводится обмен информацией между агентами и приводит к уменьшению энтропии на макроуровне за счет возрастанию энтропии на микроуровне [26 - 28]; (ii) коммуникация и передача информации на микроуровне (явление «квантовый мираж» в квантовых кораллах, см. рис. 4.б) [24]; (iii) различные типы квантовой корреляции спинов (или запутанных состояний – entanglement), используемых при проектировании различных самоорганизующихся структур; например, в квантовых точечных структурах [25]; (iv) координированное управление за счет извлечения и обмена информацией; например, самоорганизация коллектива роботов [29] за счет информационно-энтропийного обмена между агентами [28] и уровнями организации [26].

На рис. 4 отмечены перечисленные особенности моделей самоорганизации. Рассмотрим модель квантового алгоритма управления самоорганизацией, включающего перечисленные эффекты и особенности моделей самоорганизации.

3.2 Структура квантового алгоритма управления самоорганизацией

Рассмотрим предварительно необходимые определения и факты из теории квантовых вычислений, квантовой теории информации и квантовых алгоритмов [8 - 11], используемых в структуре квантового алгоритма управления самоорганизацией [7].

А. Структура и особенности квантовых алгоритмов.

Структурно квантовый алгоритм (КА) базируется на основных квантовых операторах теории квантовых вычислений: суперпозиции классических состояний; оператор формирования запутанных состояний (квантовый оракул); интерференции, а также (классических необратимых) измерениях.

Рисунок 5,а показывает обобщенную структуру КА в теории квантовых вычислений.

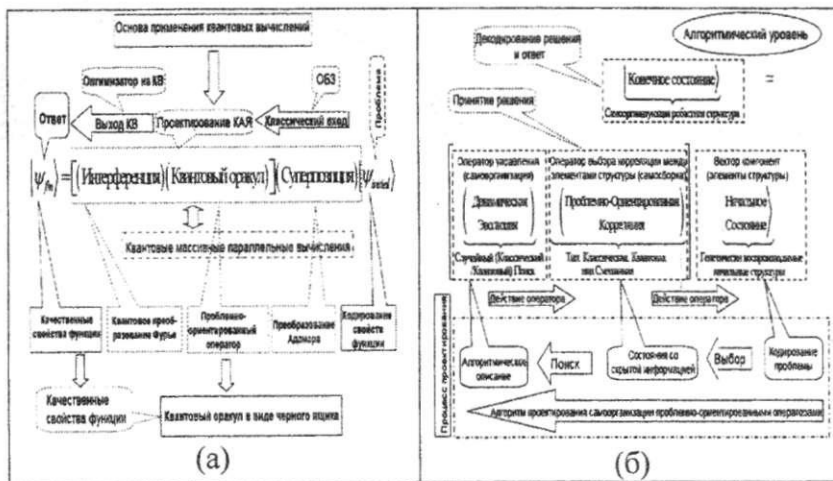


Рис. 5. Структура и основные операторы квантовых алгоритмов: (а) структуры и функциональные связи квантового алгоритма; (б) структура и функциональные связи квантового алгоритма управления самоорганизацией

В общем виде модель квантовых вычислений [8,10] состоит из пяти этапов:

(1) приготовление начального (классического или квантового) состояния $|\psi_{in}\rangle$; (2) выполнение преобразования Адамара для начального состояния с целью подготовки состояния суперпозиции; (3) применение запутанного оператора или оператора квантовой корреляции (квантового оракула) к суперпозиционному состоянию; (4) исполнение оператора интерференции; (5) использование оператора измерения для извлечения результатов квантовых вычислений $|\psi_{fin}\rangle$ и $|\psi_{fin}\rangle = H|\psi_{in}\rangle$, где H - Гамильтониан системы.

КА составляют физически обоснованный базис не только техники ускорения вычислений, но и поиска решений сложных проблем, используя такие квантовые законы, как *суперпозиция* для расширения пространства возможных решений, *квантовый параллелизм* процессов вычислений в интересах ускорения поиска решений и *квантовая интерференция* с целью извлечения искомого решения [9 - 11].

Дополнительно к отмеченным вычислительным ресурсам *квантовая корреляция* рассматривается как новый физический вычислительный ресурс, позволяющий резко увеличить успешный поиск решений алгоритмически неразрешимых проблем [6] ранее не рассматриваемых в классической области вычислений. Данный формализм может быть выражен на языке квантовых состояний или операторных преобразований, но мы интересуемся также возможностью адекватного описания на языке логического вывода квантовых состояний и эффектов: применение традиционного формализма, его мощности и выразительности как *квантовой системы нечёткого логического вывода* [7, 30].

Работа квантовых операторов осуществляется в итеративном режиме в зависимости от типа КА.

Б. Обобщенная структура КА управления самоорганизацией.

С точки зрения теории квантовых вычислений, КА управления самоорганизацией, представленный на рис. 5,б, включает все необходимые операторы (действие справа налево) и содержит следующие этапы и особенности: приготовление состояния суперпозиции; выбор типа квантовой корреляции; применение квантового оракула (модель «черного ящика») и передача извлеченной информации (динамическая эволюция «интеллектуального» состояния сигнала управления по критерию минимума энтропии); квантовая корреляция выше классической корреляции и рассматривается как дополнительный ресурс квантового алгоритма; применение оператора конструктивной интерференции используется для извлечения искомого (найденного) решения; применяется эффект квантовых массивных вычислений; используется усиление амплитуды вероятности искомого решения; и осуществляется решение классической алгоритмически не решаемой задачи на основе применения эффективных квантовых стратегий принятия решений [8].

Перечисленные эффекты достигаются с помощью квантовых операторов, основные свойства которых приведены в [7]. Выбор и определение типа и вида квантовой корреляции зависит от класса нелинейности объекта управления (ОУ) и для конкретных ОУ рассмотрены в [8]. В [7, 8] также рассмотрены вопросы вычисления «интеллектуального» состояния сигнала управления по критерию минимума энтропии и другие перечисленные вопросы применения разработанного КА управления процессом самоорганизацией знаний.

В. Физическая интерпретация КА управления самоорганизацией.

С точки зрения процесса биологически воспроизводимой эволюции самоорга-

низации (см. рис. 4) на первом этапе оператор суперпозиции реализует процедуру формирования множества независимых элементов структуры (*templating*) и осуществляет кодирование искомого решения.

При этом формируется процедура взаимодействия элементов микро- и макроуровней с обменом информации активных агентов.

Примечание. Под активными агентами макроуровней понимаются, например, текущие значения процесса управления, полученные как результат реакции от робастных БЗ НР, а под активными агентами микроуровня понимаются виртуальные значения процесса управления, полученные при применении к реальным значениям макроуровня. Выбор типа квантовой корреляции реализует процесс самосборки требуемой структуры, используя ресурс взаимодействия через процессы коммуникации и передачи информации на микроуровне. В этом случае тип корреляции определяет уровень робастности ИСУ. С помощью применения квантового оракула вычисляется «интеллектуальное» квантовое состояние структуры самоорганизации, которое содержит ценную информацию для использования и реализации координированного управления. Интерференция используется для извлечения результатов координированного управления и проектирования робастных знаний. Конкретная модель КА управления самоорганизацией [13] на основе квантового нечеткого вывода и ее применение в технологии проектирования робастных БЗ рассмотрена в [8].

Г. Цель применения КА управления самоорганизацией.

Рисунок 6,а показывает основное термодинамическое соотношение качества робастного интеллектуального управления, и критерий оптимизации, используемые в КА самоорганизации [5, 6].

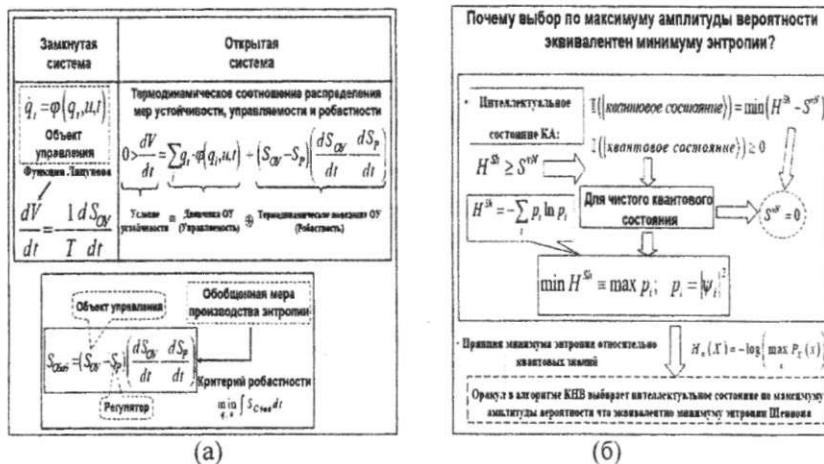


Рис. 6. Проектирование качества робастного управления:
 (а) - термодинамический критерий качества робастного управления; (б) - выбор «интеллектуального» квантового состояния

Примечание. На рис. 6 приняты следующие обозначения: V - функция Ляпунова; S_{OU}, S_P - производство энтропии в ОУ и регуляторе, соответственно;

S^{vN} - квантовая энтропия фон Неймана; ψ - волновая функция; p_i - вероятность события.

Рисунок 6,6 иллюстрирует вычислительный процесс выбора «интеллектуального» квантового состояния по принципу минимума энтропии (максимум амплитуды вероятностей). Как отмечалось в разделе 3.1, в процессе эволюции самоорганизации достигается сбалансированное соотношение между используемым и потенциальными ресурсами эволюции (информационно-термодинамического) поведения динамической системы. Отметим следующие аспекты разработки модели самоорганизации: 1) целью разработанного квантового алгоритма управления самоорганизацией знаний является достижение термодинамического критерия оптимального распределения уровней устойчивости, управляемости и робастности, используемого в контуре управления в реальном времени [12,13]; 2) принцип минимума обобщенной энтропии системы «динамический ОУ + регулятор» позволяет одновременно достичь максимального уровня робастности и реализовать оптимальное интеллектуальное управление с минимальной потерей полезного энергетического ресурса [14, 15].

Д. Отличие модели квантового алгоритма управления самоорганизации от биологически воспроизводимой эволюции самоорганизации.

Основными отличиями являются следующие аспекты: (1) КА управления самоорганизацией описывается как логический процесс использования ценной квантовой информации, извлекаемой из классических состояний, используя квантовые стратегии принятия решений и факты из квантовой теории информации; (2) содержит выбор типа и вида квантовой корреляции, влияющие на формирование и вид структуры проектируемой системы; (3) структурно КА включает все необходимые качественные особенности и операторы естественной (биологически воспроизводимой) самоорганизации, которые описываются квантовыми операторами теории квантовых вычислений; (4) является новым поисковым квантовым алгоритмом, с помощью которого возможно решать классические алгоритмически неразрешимые задачи управления; (5) реализуется в реальном времени, используя реакцию классических НР на новую ошибку управления в непредсказуемой ситуации управления для проектирования робастного интеллектуального управления; (6) поддерживает термодинамическое соотношение оптимального распределения качества управления (между устойчивостью, управляемостью и робастностью) для проектирования интеллектуальных самоорганизующихся процессов управления (см. детальное изложение и примеры применения КА самоорганизацией робастных БЗ в ИСУ в [8]).

Заключение

Приведенные результаты позволяют дать корректную интерпретацию решению следующей трудной и принципиально важной для теории и систем управления проблемы: определение роли и влияния квантовых эффектов на повышение уровня робастности проектируемых интеллектуальных процессов управления. Разработанная модель квантового алгоритма управления реализует принцип самоорганизации (знаний) и оптимального распределения уровней устойчивости, управляемости и робастности в соответствии с разработанным термодинамическим критерием качества управления (минимум обобщенного произведения энтропии). Технологии интеллектуальных вычислений типа (мягких и квантовых) составляют базис для проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций управления.

Список цитированной литературы

- [1] Ульянов С.В. Нечеткие модели интеллектуальных систем управления: теоретические и прикладные аспекты // Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика. – 1991. – № 3. – С. 3 – 29.
- [2] Kaynak O., Zadeh L.A., Turksen B. Computational intelligence: Soft computing and fuzzy-neuro integration with applications. - N.Y.: Springer Verlag, 1998. - 438 p.
- [3] Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art // IEEE Control Syst. Mag. – 2006. - Vol. 26, N 1. – P. 42 – 54.
- [4] Ulyanov S. S. Engineering management in the field of high information technology of fuzzy control system's design: Methods of intellectual property protection and business models of intelligent control systems // Proc. of the 7th ICAFS. – Siegen, 2006. – P. 218 – 239.
- [5] Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С. Проектирование робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно-нелинейными динамическими системами. Ч. II // Изв. РАН. ТИСУ. – 2006. – № 5. – С. 69 – 97.
- [6] Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В. Сложность конечных объектов и информационная теория управления // Техн. Кибернетика. – 1979. – Т. 11. – С. 77 – 147.
- [7] Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С. Квантовый нечеткий вывод для создания баз знаний в робастных интеллектуальных регуляторах // Изв. РАН. ТИСУ. – 2007. – № 6. – С. 71 – 126.
- [8] Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S. Quantum information and quantum computational intelligence: Applied quantum soft computing in AI, computer science and intelligent wise robust control. – Milan: Milan University Publ., 2008. - Vol. 86. – 873p.
- [9] Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S. Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum probability, physics of quantum information and information geometry, quantum computational logic and quantum complexity. – Milan: Milan University Publ., 2005. - Vol. 83. – 468p.
- [10] Benenti G., Casati G., Strini G. Principles of quantum computation and information. - Singapore, World Scientific, 2004. - Vol. I. – 326p. - 2007. - Vol. II. – 286p.
- [11] Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum computation and quantum information - Cambridge: University Press, 2000. – 638p.
- [12] Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Hagiwara T. Design of selforganized intelligent control systems based on quantum fuzzy inference: Intelligent system of systems engineering approach // Proc. IEEE Intern. Conf. SMC'2005. – Vol. 4. – Hawaii, 2005. – P. 3835 – 3840.

- [13] Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S. Quantum swarm model of self-organization process based on quantum fuzzy inference and robust wise control design // Proc. of the 7th ICAFS. – Siegen, 2006. – P. 10 – 19.
- [14] Litvintseva L.V., Ulyanov S.V., Takahashi K. Design of selforganized robust wise control systems based on quantum fuzzy inference // Proc. World Congress WAC'2006. – Vol. 5. – Budapest, 2006. – P. 234 – 239.
- [15] Ulyanov S.V. Self-organization of robust intelligent controller using quantum fuzzy inference // Proc. IEEE Int. Conf. ISKE'2008. – Xiamen, 2008. – P. 176 – 182.
- [16] Пат. 6,578,018 B1 США. System and method for control using quantum soft computing / S.V. Ulyanov. Опубл. 10.07.2003.
- [17] <http://www.qcoptimizer.com> (дата обращения: 23.12.2008).
- [18] Self-organization in biological systems / S. Camazine. – Princeton: Univ. Press, 2003. – 326p.
- [19] Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems // Reviews of Modern Physics. – 2001. – Vol. 73, N 4. – P.1067 - 1141.
- [20] Mamei M., Menezes R., Tolksdorf R. Case studies for self-organization in computer science // J. Systems Architecture. – 2006. – Vol. 52, N 8-9. – P. 443 - 460.
- [21] Detrain C., Deneubourg J.-L. Self-organized structures in a superorganism: do ants «behave» like molecules? // Physics of Life Reviews. – 2006. – Vol. 3, N 3. – P. 162 - 187.
- [22] Ben-Jacob E., Levine H. Self-engineering capabilities of bacteria // J. R. Soc. Interface. – 2006. – Vol. 3, N 2. – P. 197 – 214.
- [23] Summhammer J. Quantum cooperation of two insects // LANL E-print arXiv: quant-ph / 0503136v2. – 2006. – 23p. (доступно <http://xxx.lanl.gov>)
- [24] Eigler D. M., Lutz C. P., Crommie M. F. Information transport and computation in nanometre-scale structures // Phil. Trans. R. Soc. Lond. – 2004. – Vol. A362. – P. 1135–1147.
- [25] Correa A.A., Reboredo F.A., Balseiro C.A. Quantum corral wave-function engineering // Physical Review B. – 2005. – Vol. B-71, N 3. – P.035418.
- [26] Parunak H., Brueckner S. Entropy and self-organization in multi-agent systems // Proc. 5th Intern. Conference on Autonomous Agents. – Montreal, 2001. – P. 124 - 130.
- [27] Adami Ch. Information theory in molecular biology // Physics of Life Reviews. – 2004. – Vol. 1, N 1. – P. 3 – 22.
- [28] Guerin S., Kunkle D. Emergence of constraint in self-organizing systems // Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences. – 2004. – Vol. 8, N 2. – P. 131 – 146.

- [29] Baldassarre G., Trianni V., Dorigo M. Self-organized coordinated motion in groups of physically connected robots // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. – 2007. - Vol. B-37, N 1. - P. 224 - 239.
- [30] Dalla Chiara M.L., Guintini R., Greechie R. Reasoning in quantum theory: Sharp and unsharp quantum logic. - Holland: Kluwer Acad. Publ., 2004. – 312p.